

量子引力实现物理大统一的可行性研究

林曼曼

杭州太空浏览科技有限公司, 中国·浙江 杭州 325200

摘要: 量子引力旨在统一广义相对论宏观引力规律与量子力学微观体系, 是当代基础物理核心难题。本文对比经典引力、相对论引力与量子理论的适配差异, 梳理多项前沿验证实验, 依托相关理论公式分析黑洞量子效应与信息悖论。针对平直费曼图的缺陷, 构建弯曲时空修正体系, 论证量子与引力统一的可行性。目前广义相对论与量子热力学已初步衔接, 但黑洞内部结构、普朗克尺度动力学等问题仍悬而未决, 完备的量子引力理论仍需继续研究完善。

关键词: 量子引力; 广义相对论; 波函数; 霍金辐射

A feasibility study on achieving a grand unification of physics through gravitational quantum theory

Lin Manman

Hangzhou Space Exploration Technology Co., Ltd., China Zhejiang Hangzhou 325200

Abstract: Quantum gravity aims to unify the macroscopic gravitational laws of general relativity with the microscopic mechanisms of quantum mechanics, representing a central challenge in modern fundamental physics. This paper compares the discrepancies in adapting classical gravity, relativistic gravity, and quantum theory, reviews several cutting-edge experimental verification efforts, and analyzes black hole quantum effects and information paradoxes using relevant theoretical formulas. To address the limitations of flat Feynman diagrams, a modified curved spacetime framework is proposed to demonstrate the feasibility of unifying quantum and gravitational theories. While initial connections have been established between general relativity and quantum thermodynamics, unresolved issues remain regarding black hole internal structures and dynamics at the Planck scale; a comprehensive quantum gravity theory still requires further research and refinement.

Keywords: Quantum gravity; General relativity; Wave function; Hawking radiation

0 引言

四大基本相互作用中, 电磁、强、弱相互作用已通过量子场论实现统一描述, 唯有引力难以纳入量子体系, 量子引力成为基础物理研究前沿核心方向^[1]。现有引力理论分为两大体系: 适用于宏观低速弱场的牛顿万有引力定律, 以及刻画大质量天体时空弯曲、强引力场行为的爱因斯坦广义相对论引力场方程; 微观粒子演化规律则由量子力学波函数、叠加态、不确定性原理、真空量子涨落等核心概念支撑。二者数学框架、时空基础存在本质分歧, 难以自然自治, 学界长期开展理论推演与实验模拟双向探索。当前验证量子引力的实验路径分为两类: 一是天文观测与深空精密测量, 利用光子钟、黑洞观测获取强引力量子效应; 二是实验室低温模拟, 借助玻色-爱因斯坦凝聚体系构建人工模拟黑洞, 复现霍金辐射等量子引力耦合现象。贝肯斯坦-霍金熵公式首次将引力几何量(黑洞视界面积)与量子统计熵、普朗克尺度常量结合, 搭建起宏观引力几何与微观量子热力学的桥梁^[2]。费曼图作为量子场论核心可视化工具, 可直观表征粒子产生、湮灭、纠缠演化过程, 但传统平直时空二维图示无法适配广义相对论弯曲时空, 存在几何建模缺陷, 亟待修正以适配黑洞、宇宙

奇点等强引力场景。本文依次对比经典引力、相对论引力与量子波函数的理论相容性, 梳理前沿实验验证成果, 解析黑洞体系下量子引力耦合机制, 修正费曼时空图示框架, 探讨费曼图体系统一量子行为与引力效应的理论可能性。

1 经典引力、广义相对论与量子波函数的理论基础对比

(1) 牛顿万有引力定律与波函数的理论分歧。

量子力学波函数 $\psi(x,t)$ 表征微观粒子在时空域的概率密度, 核心物理内涵: 粒子在真空传播时, 空间范围随时间扩张, 粒子概率密度随传播距离衰减; 以恒星光源为例, 近源区域粒子数密度更高, 远距离真空粒子密度显著降低。波函数可描述粒子叠加态, 双缝干涉实验证实光子衍射的量子随机叠加行为。二者核心矛盾: 牛顿引力为静态经典力学框架, 无时间演化微分结构, 不包含量子概率、叠加态、真空涨落等微观效应, 无法描述引力对光子、基本粒子的微弱量子扰动, 数学层面不存在自治耦合关系, 无法直接联立实现量子与引力统一。

(2) 广义相对论引力场方程的量子适配基础爱因斯坦引力场方程以时空几何曲率表征引力, 核心逻辑为: 天体质量分布引发四维时空弯曲, 引力本质是弯曲时空中测地

线运动^[3]。场方程可定量求解天体周边弯曲时空范围内的量子能量密度，能够定量测算光线在引力场中的偏折效应，从几何层面建立质量、引力、时空、能量密度的关联。相较于牛顿引力，广义相对论天然包含动态时空结构，具备与量子波函数结合的基础：引力场方程提供弯曲时空几何基底，波函数可描述弯曲背景下微观粒子的不确定性、量子叠加演化。但二者仍存在底层冲突：广义相对论为经典确定性几何理论，允许时空尺度无限趋近于 0（黑洞奇点）；量子力学受不确定性原理约束，存在普朗克长度 $l_p \approx 1.616 \times 10^{-35} \text{m}$ 最小可测尺度，低于该尺度时空物理量无法精确测量。

（3）普朗克尺度对奇点模型的修正约束传统广义相对论史瓦西解推导出黑洞奇点体积无限小、密度趋于无穷大，该结论违背量子尺度约束。普朗克密度为宇宙理论最大密度上限，现有测算表明黑洞实际密度远低于普朗克密度，证明奇点并非无限致密点；量子反弹理论替代经典宇宙大爆炸奇点模型，以普朗克尺度为下限规避无穷大物理量，实现量子规则与宇宙引力演化初步调和。

2 量子引力前沿验证实验体系

（1）深空精密测量：光子钟量子引力探测实验美国伊利诺伊大学团队采用远距离分布式光子钟装置，通过高精度光子时序测量捕捉引力场对量子光子态的微弱扰动，定量刻画引力与量子态演化的耦合关联。引力对光子作用效应极微弱，仅超高精度光学测量设备可识别引力波引发的光子量子态偏移，为真空弱引力场下量子引力效应提供直接观测思路。

（2）玻色-爱因斯坦凝聚（BEC）模拟黑洞实验验证霍金辐射 2010 年，麻省理工学院、以色列理工学院、苏黎世联邦理工学院 Steinhauer 团队搭建超低温玻色-爱因斯坦凝聚实验平台，2023 年，中国科学院理论物理所，天津大学团队，在超导量子芯片上实现观测到准粒子通过视界辐射的现象，证实了类比的霍金辐射谱。以半导体材料构建人工声学模拟黑洞：

实验体系维持近绝对零度低温，复刻真实黑洞视界低温环境；

利用声波单向传播特性模拟黑洞视界单向捕获效应，声波无法逆向传播，仅可在探测端接收辐射信号；

实验数据完整印证霍金辐射理论预言，证实强引力视界处真空量子涨落产生正反粒子对的物理过程。

模拟黑洞与真实黑洞的差异辨析声学模拟黑洞以声子（机械振动波）为研究载体，依赖介质传播，无法在真空存续；宇宙真实黑洞中演化的光子、正反电子属于物质波，具备波粒二象性、量子叠加与真空中无介质传播特性。二者

核心共性为视界单向捕获、低温热力学辐射；核心局限为模拟体系无法复刻黑洞内部物质组分，黑洞信息丢失悖论仍存在理论争议：电磁波信息落入视界后是被完全吸收抑或穿透时空，暂无观测定论。

3 黑洞体系下量子引力耦合核心理论：霍金辐射与贝肯斯坦-霍金熵

（1）真空量子涨落与黑洞视界量子纠缠机制宇宙真空持续发生无规量子涨落，瞬时生成一对纠缠虚粒子，遵循海森堡不确定性原理^[4]。在弱引力真空环境中，粒子对快速湮灭，传播方向完全随机；黑洞视界强引力场会打破粒子对平衡：其中一个纠缠粒子被视界捕获落入黑洞内部，另一粒子逃逸至无穷远真空形成霍金辐射。若落入视界粒子携带量子信息，信息留存于黑洞内部，外部探测器无法获取内部量子态，由此衍生黑洞信息悖论。贝肯斯坦与霍金将量子统计、引力几何、热力学结合，建立黑洞熵公式打通宏观引力与微观量子统计通道。

（2）贝肯斯坦-霍金熵公式及其物理内涵黑洞熵标准规律：

黑洞视界表面积与熵正相关，视界面积越大，黑洞熵越高；

黑洞质量与辐射温度负相关：恒星级超大黑洞辐射温度趋近绝对零度，蒸发速率极慢，甚至吸积盘捕获能量大于辐射逃逸能量，黑洞质量持续增长；微型黑洞视界面积极小，辐射温度极高，蒸发速度快。

黑洞吸积盘不属于黑洞本体，盘区量子涨落生成的粒子对仅部分被黑洞捕获，剩余粒子构成霍金辐射向外传播；辐射本质为黑洞内部量子能量向外耗散，持续损耗黑洞总质量。

（3）史瓦西黑洞解与天体坍缩临界质量史瓦西经典解给出恒星坍缩黑洞临界阈值：恒星核心残余质量大于 2.2 倍太阳质量时，引力坍缩形成恒星级黑洞；低于该临界质量，恒星燃尽后演化形成白矮星、中子星。理论层面存在原初微型黑洞，但天文观测尚未发现对应实体；现有观测数据显示银河系中心半人马座 A 黑洞质量约为太阳 5500 万倍，属于超大质量史瓦西黑洞。

4 费曼图时空坐标体系：平直图示缺陷与弯曲时空修正方案

（1）传统费曼图构造逻辑与几何缺陷费曼图是量子场论表征费米子、玻色子、正反粒子、虚粒子产生、湮灭、纠缠演化的核心图示工具，《漫画物理学》采用简化二维图示建模：垂直向上箭头代表空间维度，水平平行箭头代表时间维度，粒子演化绘制于两坐标轴之间。该建模存在严

格几何缺陷:

标准二维平面要求坐标轴闭合构成完整平面区域,书中坐标轴相互独立无边界闭合,仅为一维线条组合,不满足二维平面几何定义;

仅平直时空建模,未考虑广义相对论时空弯曲效应,无法适配黑洞、致密天体强引力场环境;

空间箭头刻度越大表征空间尺度越大,理论上空间尺度越大粒子总量越高,但真空量子涨落具有随机衰变特征,平直时空坐标在弱引力真空中物理意义失效。

(2) 适配弯曲引力时空的修正费曼图框架为匹配广义相对论高斯弯曲坐标系,对费曼图进行几何修正:

增设方形边界框闭合坐标轴,框内绘制网格刻度,分别标注时空量化数值,构建完整二维图示平面;

在网格内引入曲线坐标表征时空曲率,适配大质量天体周边弯曲时空;

区分强弱引力场图示适用条件:

弱引力真空:时空近似平直,量子涨落随机,时空坐标描述力大幅下降;

恒星、黑洞强引力视界:时空曲率显著,粒子数密度提升、衰变频率增加,时空坐标具备明确物理意义,可联立引力场方程、霍金熵公式定量分析。

(3) 费曼图统一量子与引力的理论可能性修正后费曼图可联立表征引力强度与量子演化:以纵向箭头刻度表征引力场强度,横向刻度表征粒子振荡频率,二者呈正比关联。以正反电子湮灭过程为例:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

正、负电子湮灭生成一对真实纠缠光子,光子对沿相反方向、垂直角直线方向传播或者方向随机;在黑洞强引力视界背景下,将该粒子演化过程绘制于弯曲费曼网格中,同步引入引力场方程求解的局部粒子密度、霍金熵给出的视界温度参数,实现引力几何效应与量子粒子演化在同一图示体系下统一描述。从形式化框架层面,修正费曼图搭建起量子粒子行为与引力时空曲率的可视化统一载体。

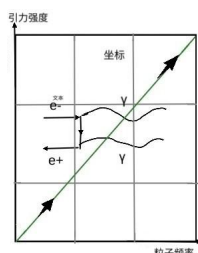


图1 费曼图坐标

5 讨论

理论层面:牛顿万有引力仅适用于宏观弱场,无法与

波函数自洽联立;广义相对论几何框架结合普朗克尺度约束、贝肯斯坦-霍金熵公式,已实现引力几何与量子热力学的数学衔接,是量子引力统一的核心理论基础;量子反弹模型、霍金辐射理论解决了经典引力奇点无穷大矛盾,调和量子不确定性原理与引力时空几何。

实验层面:光子钟深空测量、BEC 声学模拟黑洞两类实验分别从真实宇宙、实验室模拟两条路径验证量子引力耦合效应,BEC 实验直接证实霍金辐射存在,但模拟体系介质限制使其无法完整复刻黑洞微观物质结构,黑洞信息悖论仍有待进一步观测论证。

图示工具层面:传统平直费曼图存在几何建模缺陷,修正后的闭合网格弯曲时空费曼图可区分强弱引力场适用场景,能够同步表征引力强度、时空曲率、粒子纠缠与衰变过程,提供了量子引力形式统一的可视化分析工具,但该图示体系仅为辅助描述手段,尚未形成完备解析数学体系。

当前量子引力仍未构建完成统一场论,黑洞内部物质组分、普朗克尺度完整动力学方程、真空量子涨落与时空曲率的精确耦合函数仍是未解难题。国内物理学研究依托 SpringerNature 等国际学术平台持续推进理论与实验创新,结合通俗物理科普著作(如《漫画物理学》)简化前沿理论传播,有助于拓宽量子引力研究人才储备,推动理论突破。

6 结语

伊利诺伊大学光子钟测量、Steinhauer 团队 BEC 模拟黑洞实验,分别从天文观测、实验室模拟角度验证了引力场与量子态耦合、霍金辐射等量子引力核心效应,是现阶段最具代表性前沿实验方案。

传统二维平直费曼图存在几何构造漏洞,增设闭合边界、引入弯曲坐标的修正费曼图示,可适配黑洞等强引力弯曲时空,能够同步表征引力强度、时空曲率与粒子量子演化,在形式框架上实现量子行为与引力效应的统一描述。

黑洞视界真空量子涨落、量子纠缠、霍金辐射、黑洞熵构成量子引力研究核心体系,但黑洞内部物质组分、信息丢失悖论、普朗克尺度完整动力学方程仍存在理论空白,完备量子引力统一理论仍需长期理论推演与高精度天文、实验室实验持续验证。

参考文献:

- [1] 霍金. 时间简史[M]. 许明贤, 吴忠超, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- [2] 本亚明·巴尔, 鲍里斯·莱麦尔, 里娜·皮科洛. 漫画物理学[M]. 科普译丛.
- [3] 爱因斯坦. 广义相对论基础[J]. 物理学年鉴.
- [4] 普朗克. 量子理论基础研究[M]. 理论物理译著.